

声光可调谐滤波器成像光谱仪非球面光学系统设计

熊胜军 张颖 赵慧洁 李旭东 周鹏威

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 教育部精密光机电一体化技术实验室, 北京 100191)

摘要 基于声光可调谐滤波器(AOTF)的工作原理,设计了一套工作在 440~780 nm 的光谱成像光学系统。该光学系统通过引入一面偶次非球面提高了系统的成像质量,简化了镜头的结构,提高了光学系统的透射率。前置光学系统采用由一组双胶合透镜构成的像方远心光路。后置成像光学系统由一组三胶合透镜构成,其中包含一面非球面,根据非球面变形系数与初级像差间的贡献关系,完成了非球面及其位置的优化和对 AOTF 的+1 级衍射光成像。光学系统在 32 lp/mm 的空间频率下的调制传递函数(MTF)大于 0.6,像质优良,加工装调公差适中。

关键词 光学设计;光谱成像系统;非球面;声光可调谐滤波器

中图分类号 TH744.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0622002

Aspheric Optical Design of an Imaging Spectrometer Based on Acousto-Optic Tunable Filter

Xiong Shengjun Zhang Ying Zhao Huijie Li Xudong Zhou Pengwei

(Key Laboratory of Precision Opto-Mechatronics Technology, Ministry of Education,

School of Instrumentation Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract Based on the principle of acousto-optic tunable filter (AOTF), the optical system of an imaging spectrometer is designed. The spectral range of the system covers 0.44~0.78 μm . An even aspheric surface is used to improve the imaging quality, optical transmissivity and simplify the lens structure. A telecentric optical arrangement is designed using a doublet lens for the fore-optical system. And for the rear imaging lens, a triplet lens is used which contains an aspheric surface. The aspheric surface and its location are optimized based on the primary aberrations theory of aspheric. The system takes the +1 order diffracted beams for imaging. The modulation transfer function (MTF) of the optical system is better than 0.6 at the spatial frequency of 32 lp/mm and the tolerance is moderate.

Key words optical design; spectral imaging system; aspheric surface; acousto-optic tunable filter

OCIS codes 220.1250; 080.2740; 110.4234

1 引 言

声光可调谐滤波器(AOTF)是比较典型的可调谐滤光片分光器件,是根据各向异性介质中的声光衍射原理制成的新型分光器件。将 AOTF 应用于成像探测,其缺点在于成像质量不佳, AOTF 衍射过程中对光的散射作用使像随着波段的不同产生漂移,另外 AOTF 作为平行玻璃板还会引入球差和色

差,晶体内的超声波吸收不彻底产生多次反射而相互干扰等,都会造成成像模糊^[1]。

为了得到较高的成像质量,基于 AOTF 的成像光谱仪采用透射式球面光学系统往往需要相当复杂的结构,如 20 世纪 90 年代,美国喷气推进实验室(JPL)研发的多套双相机成像光谱仪^[2]、美国 NASA/GSFC 于 2003 年研制的两通道的声光成像

收稿日期: 2011-10-11; 收到修改稿日期: 2012-01-09

基金项目: 国家 863 计划(2008AA12A201)和国家自然科学基金(61107013)资助课题。

作者简介: 熊胜军(1986—),男,硕士研究生,主要从事光谱成像光学系统方面的研究。E-mail: xiong0515@sina.com

导师简介: 李旭东(1974—),男,副教授,主要从事精密光电测量及视觉测量等方面的研究。

E-mail: xdli@buaa.edu.cn

光谱仪 AIMS^[3]和 2009 年中国科学院西安光学精密机械研究所设计的成像光谱仪^[4],不仅增加了光学系统设计加工的成本,对机械系统的加工要求较高,装调困难,而且光学系统对光能的吸收、反射损失较大,降低了系统的信噪比,不利于高光谱系统在弱光环境下的探测。非球面在像差优化、结构简化方面具有独特的优势,有利于光学系统的大孔径化、广角化和轻量化^[5~9]。光学非球面的设计和加工目前已经比较成熟,国内加工直径较小的轴对称高次非球面的面型误差峰谷值(PV)已经达到 0.3λ ^[9],其中 λ 为光波长,因此本文应用非球面简化系统结构,设计了一套仅由两组胶合透镜组构成的成像光学系统,其中使用了一面高次非球面,光学系统公差适中。

2 光学系统构成及参数分配

光学系统由前置光学系统、AOTF、后置成像光学系统及 CCD 组成,如图 1 所示。

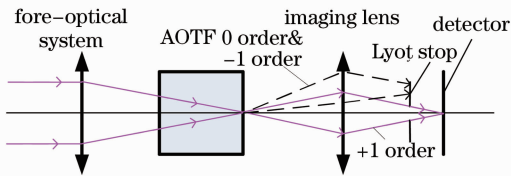


图 1 光学系统结构示意图

Fig. 1 Structure of the optical system

入射光束经前置光学系统后一次成像在 AOTF 后出射面上,通过计算机控制加在 AOTF 上射频驱动器的射频(RF)频率以改变滤光波长,调谐产生 ± 1 级偏振态正交的 o 与 e 衍射光和非衍射 0 级光,它们之间会偏离一定的角度出射。 $+1$ 级光经过后置光学系统后二次成像在探测器上。同时通过一组透偏方向相互垂直的偏振片^[10]及挡光光阑消除 0 级光和 -1 级光。

AOTF 采用非共线 TeO_2 晶体,晶体通光孔径为 $\Phi 10$ mm,晶体厚度为 31.2 mm,对 o 光优化设计的角孔径为 $\pm 3^\circ$,晶体的出射面上优化设计了一个楔角,使 1 级衍射光能够共轴出射,减小成像光束随波长变化产生的漂移,提高晶体的成像性能^[11]。

系统的工作波段为 440~780 nm,视场角 $2\omega = 10^\circ$,CCD 上的成像范围为直径方向 512 pixel 的圆形区域,像素尺寸为 $16 \mu\text{m} \times 16 \mu\text{m}$,要求光学系统弥散斑均方根(RMS)直径需小于 1 pixel,在 CCD 相机的尼奎斯特频率(32 lp/mm)处的调制传递函

数(MTF)大于 0.5。

对 AOTF 的前置光学系统和后置成像光学系统分别选型然后综合优化,要求系统在满足指标要求的同时,使用较简单的结构,减少透镜的数量,提高光学系统的透射率。前置光学系统选用像方远心光路^[1],如图 2 所示。

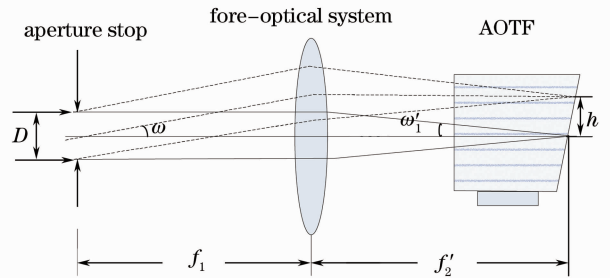


图 2 前置光学系统结构示意图

Fig. 2 Structure of the fore-optical system

孔径光阑位于物镜的前焦面上,构成像方远心光路。光束通过像方远心光路后形成的会聚锥光的主光线平行于光轴,且不同视场的锥光的光锥角度是一样的,而 AOTF 的空间分辨率和衍射效率是随入射光角度的变化而变化的,这样 AOTF 全孔径能具有相似的空间分辨率和衍射效率。 TeO_2 晶体的尺寸限制了入射到整个系统的能量,前置光学系统的相对孔径必须满足:

$$D/f'_1 < 2\tan(3^\circ) = 1 : 9.54,$$

其中 D 为入瞳直径, f'_1 为前置光学系统的焦距,才能保证 AOTF 入射面上的光线入射角 ω'_1 小于可接收半孔径角为 3° 的要求,同时能保证衍射光束和非衍射零级光束的空间分离。前置光学系统的一次像面设在 AOTF 的光束偏转面上,即 AOTF 的后出射面上能抑制衍射漂移^[1]。根据应用需求,前置光学系统的参数指标设计如下:相对孔径 $D/f'_1 = 1/10$,焦距 $f'_1 = 50$ mm。

后置光学系统将 AOTF 后出射面上的一次像二次成像在 CCD 像面上,并保证像的大小与 CCD 的尺寸匹配。一次像的半高度为 $h' = f_1 \tan \omega = -4.4$ mm,CCD 上的二次像的半高度约为 $h'' = 4$ mm,则后置光学系统的垂轴放大率为 $\beta = h''/h' = -0.91$ 。全光学系统的焦距为 -45.7 mm,相对孔径为 $1:9.1$ 。为了便于光学系统与 CCD 相机接口,并且给镜筒后的消光光阑设计预留足够的空间,成像镜的后工作距离需大于 30 mm。根据以上分析确定的光学参数如表 1 所示。

表 1 各分系统光学参数

Table 1 Optical parameter of each optical system

Name of subsystem	Focal length /mm	F number (NA)	Field angle	Special requirements
Fore-optical system	50	$F/10$	10°	A telecentric optical system
Reimaging system	29	$0.05(NA)$	± 4.4 mm(linear field)	The size of the image match with the CCD
Whole system	-45.7	$F/9.1$	10°	$f_{MTF} > 0.5 (@32$ lp/mm)

3 初步球面光学系统设计

需要对 AOTF 器件进行光学模拟。国内外基于 AOTF 进行光学设计时通常只是简单将 AOTF 当作平行玻璃板,并在光束偏转面上设置透射式光栅来模拟晶体对光的偏转作用^[2,4],这是一种近似手段。结合实验定标数据,根据 AOTF 对光线的作用机理,利用 Zemax 软件的计算机动态链接库(DLL)功能模拟 AOTF 器件,实现了 AOTF 内部的光线追迹和对光的衍射偏转作用,能直接应用于成像光学系统的优化设计阶段,为基于 AOTF 的光学设计提供了一种新的方法。

为了保证系统的成像质量,比较典型的 AOTF 成像光谱仪其前置光学系统一般由三分离物镜构成,后置成像物镜则一般由复杂化的双高斯物镜构成^[2,4],透镜与空气接触的表面数为 14~20 面,光通过的总的玻璃介质较厚,光学系统中光的反射损失和吸收损失较为严重。高光谱成像系统具有上百个谱段,而来自于目标反射的单个谱段的光辐射能量低,这就要求光学系统对入射能量的衰减尽可能小,透镜的组数不宜过多。

前置光学系统相对孔径小,视场角适中,采用消色差双胶合设计,结构简单。后置二次成像系统采用的是简单的三胶合透镜设计,以减少透镜组数。初步设计及优化的结果如图 3~5 所示。

三胶合设计能满足的视场角和相对孔径都较小,在这样的简单结构下,单纯的球面透镜系统有较大的像差。系统的弥散斑较大,边缘视场弥散斑半径 RMS 值达到了 $23.55 \mu\text{m}$,远大于像素尺寸,MTF 过低,畸变约为 5%,成像质量不佳,无法满足系统要求。为了提高系统的成像质量,同时又不增加透镜数量,可适当地引入非球面。



图 3 球面光学系统结构图

Fig. 3 Structure of the spherical optical system

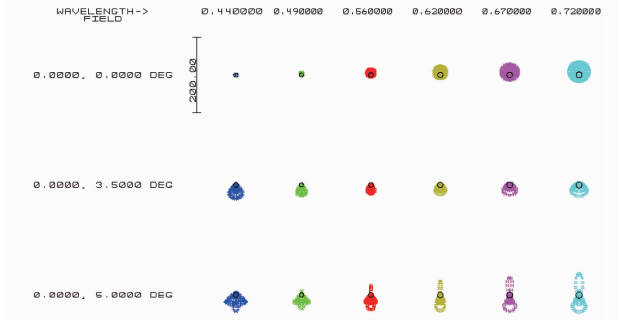


图 4 球面光学系统点列图

Fig. 4 Spot diagrams of the spherical optical system

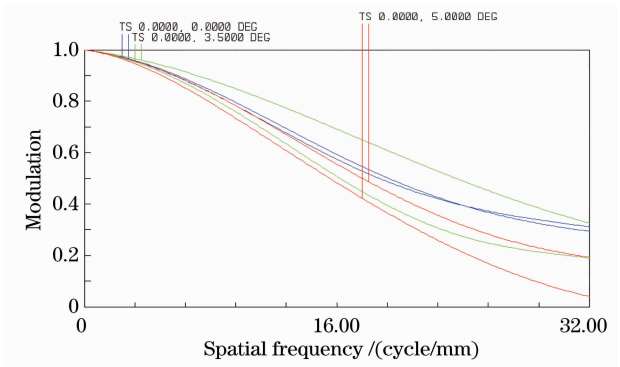


图 5 球面光学系统 MTF 曲线

Fig. 5 MTF of the spherical optical system

4 非球面光学系统设计

常用的偶次非球面可以表示为^[7]

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \alpha_1 r^4 + \alpha_2 r^6 + \alpha_3 r^8 + \alpha_4 r^{10} + \alpha_5 r^{12} + \dots, \quad (1)$$

式中 $r^2 = x^2 + y^2$, z 为镜面的凹陷度, r 为镜面的孔径半径, c 为顶点曲率, k 为二次曲面系数, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ 等为 r 的各高阶项系数。将光学系统中的部分球面改为非球面后,对初级像差系数的贡献量表示式为

$$\text{球差: } \Delta S_I = (n' - n)\Delta Bc^3h^4, \quad (2)$$

$$\text{弧矢彗差: } \Delta S_{II} = \Delta S_I \cdot h_p/h, \quad (3)$$

$$\text{象散: } \Delta S_{III} = \Delta S_I (h_p/h)^2, \quad (4)$$

$$\text{场曲: } \Delta S_{IV} = 0, \quad (5)$$

$$\text{畸变: } \Delta S_V = \Delta S_I (h_p/h)^3, \quad (6)$$

式中 ΔB 为非球面相对于球面的变形系数的初级量, h, h_p 分别为第一、第二近轴光线在非球面上的入射高度。根据(2)~(6)式可以在设计初期确定引入非球面的可能性和位置。一般地^[8]:

1) 在光阑附近设置非球面, h 较大, h_p 接近于零, 能单独控制球差;

2) 在离光阑远一点的地方设置非球面, h, h_p 适中都不为零, 能对球差、彗差、象散和畸变都产生影响;

3) 过于远离光阑的地方设置非球面, h_p 较大, h 较小, 则对畸变作用大, 且几乎只能单独控制畸变。

考虑设计的加工性能, 胶合面不宜设计成非球面, 故能设计为非球面的面只能选三胶合的前后表面。下面根据(2)~(6)式从赛德尔系数分析本光学系统中将三胶合的前后表面分别设置成非球面后对系统的初级像差的影响, 从而确定非球面的位置和初始参数。

追迹系统的第一和第二近轴光线, 其在三胶合的前后表面的入射高分别为 $h_1 = 2.813 \text{ mm}$, $h_{p_1} = 4.27 \text{ mm}$, $h_2 = 2.810 \text{ mm}$, $h_{p_2} = 3.93 \text{ mm}$ 。设非球面校正的球差量为所有面的赛德尔球差之和, 则将两面分别设置成非球面后其校正的彗差、象散和畸变的量列表如表 2 所示。

表 2 Seidel 系数校正表
Table 2 Revised Seidel coefficient table

	SPHA	COMA	ASTI	DIST
Seidel coefficient to be revised	-0.005811	-0.008013	-0.011731	-0.019399
Fore surface	-0.005811	-0.008833	-0.013426	-0.020407
Rear surface	-0.005811	-0.008135	-0.011390	-0.015945

由于两面上第一近轴光线入射高很接近, 则相同的变形系数条件下, 将两面设置成非球面对球差的校正能力相同, 而前表面的第二近轴光线入射高要大于后表面, 则将前表面设置成非球面其对彗差、象散和畸变的校正能力要强, 尤其对于畸变的校正, 从表 2 中可以看出需要校正的畸变量为 -0.019399 , 若将后表面设置成非球面, 在校正了球

差的基础上, 畸变的校正量明显不够, 而前表面的畸变贡献量与该值更为接近。综合考虑, 本设计将三胶合前表面设置成为非球面, 依次引入非球面的二次曲面系数、六次和八次项系数, 根据像差情况反复的调整操作数及权重进行优化, 平衡色差及高级像差后最终完成的设计如图 6(彩色请参见网络电子版)和表 3 所示。

表 3 光学系统的结构参数

Table 3 Structural parameter of the optical system

Surface	Type	Radius /mm	Thickness /mm	Glass	Diameter /mm
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		
Stop	Standard	Infinity	45.99		2.5
2	Standard	52.404	3.48	H-K51	7.6
3	Standard	-15.958	5.42	F5	7.6
4	Standard	-37.403	26.49		7.6
5	Standard	Infinity	0.7	ZK14	6
6	Standard	Infinity	8		6
7	AOTF front	Infinity	31.2	TEO2	5
8	Coordinate break				
9	AOTF rear	Infinity			5
10	Coordinate Break		8		
11	Standard	Infinity	0.7	ZK14	6
12	Standard	Infinity	45.98		6
13	Even Asphere	26.09	6	K9	8
14	Standard	Infinity	6	ZF2	8
15	Standard	19.25	7.5	TK1	8
16	Standard	-25.33	23.3		8
17	Standard	Infinity	26.237		1.69
IMA	Standard	Infinity			4

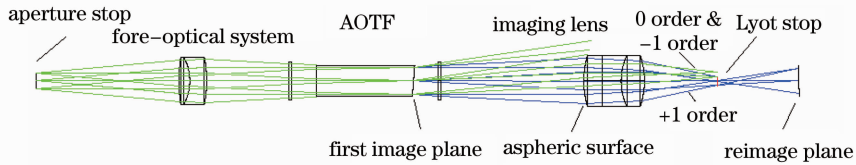


图 6 非球面光学系统结构图

Fig. 6 Structure of the aspheric optical system

非球面设计在凸面上,另一面设计为平面,且选用普通的 K9 玻璃,有利于非球面的加工。设计的非球面的系数分别为 $k = -3.9767$, $\alpha_2 = -7.293364 \times 10^{-8}$, $\alpha_3 = 1.021206 \times 10^{-10}$,非球面度较低,其口径为 $\Phi 16$ mm,加工难度不大。在出瞳

位置处 0 级光和 1 级光分开距离最大,在这里设置里奥挡光光阑,能很好地阻止 1 级光以外的非成像光束进入探测器。光学系统的点列图和传递函数分别如图 7 和图 8 所示。

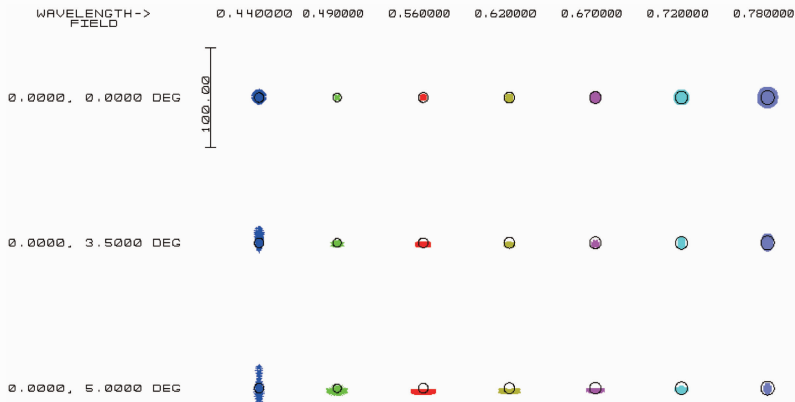


图 7 非球面光学系统点列图

Fig. 7 Spot diagrams of the aspheric optical system

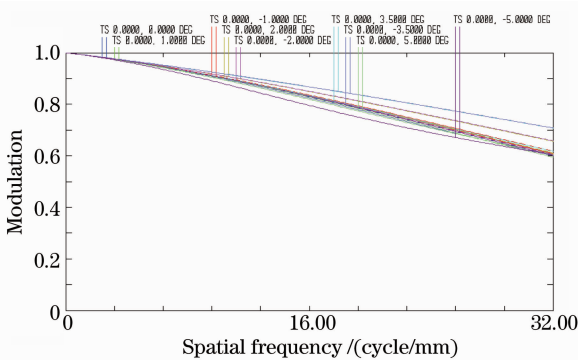


图 8 非球面光学系统 MTF 曲线

Fig. 8 MTF of the aspheric optical system

图 7 中的圆圈为系统的爱里斑,从图中可以看出各波段各视场下的弥散斑大小都接近艾里斑。弥散斑 RMS 值半径的平均值为 $5.07 \mu\text{m}$,边缘视场的弥散斑半径 RMS 值最大为 $7.34 \mu\text{m}$,小于像素尺寸。在 CCD 相机的尼奎斯特频率 (32 lp/mm) 处系统的 MTF 大于 0.6,全视场畸变小于 0.3%,均满足系统指标要求。我们对该光学系统进行公差分析和蒙特卡罗模拟,在表 4 所示的公差配置下,最坏的

情况下系统的 MTF 由于工艺因素的下降仍小于 15%,在 32 lp/mm 处的 MTF 大于 0.5,弥散斑 RMS 值半径的平均值小于 $5.48 \mu\text{m}$,仍满足系统指标要求。这样的公差对于光学加工、机械加工及装调是能够实现的。

表 4 光学系统的公差配置

Table 4 Tolerance data of the optical system

Tolerance items	Tolerance value
Thickness /mm	± 0.03
Radius /fringe	1
Surface decenter /mm	0.03
S+A Irregularity /fringe	0.2
Index	0.0005
Abbe number /%	0.50
Element decenter /mm	0.03
Element tilt /($^{\circ}$)	0.03
Aspheric surface P-V/ λ	0.5
Aspheric surface RMS/ λ	0.1

系统只有 4 个透镜与空气接触的表面,如果都镀上增透膜,且反射系数都按 0.01 计算,系统的理论反射损失与典型的球面高光谱成像系统相比可降

低 10%~17%,同时透镜组数减少,玻璃介质的总厚度的减少也能降低光学系统的吸收损失。

5 结 论

设计了一套基于 AOTF 的成像光学系统,通过引入一片高次非球面,并根据非球面变形系数与初级像差间的贡献关系,完成非球面及其位置的优化,提高了系统的成像质量,简化了光学、机械系统的结构。光学系统仅由一组双胶合前置镜与一组三胶合后置成像镜组成,通过 Zemax 仿真设计的成像质量满足设计指标要求,加工装调公差适中,系统的理论透射率较典型的球面高光谱成像系统提高大于 10%,这对高光谱成像系统意义重大。

参 考 文 献

- Dennis R. Suhre, Louis J. Denes, Neelam Gupta. Telecentric confocal optics for aberration correction of acousto-optic tunable filters[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(6): 1255~1260
- A. Deslis, C. G. Kurzweil, C. C. LaBaw *et al.*. Optical design of an imaging spectrometer utilizing an acousto-optic tunable filter as a disperser[C]. *SPIE*, 1998, **3482**: 170~178
- David A. Glenara, Diana L. Blaney, John J. Hillman. AIMS: Acousto-optic imaging spectrometer for spectral mapping of solid surfaces[J]. *Acta Astronautica*, 2003, **52**(2-6): 389~396
- Chang Lingying, Zhao Baochang, Qiu Yuehong *et al.*. Optical design of imaging spectrometer based on acousto-optic tunable filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 3021~3026
常凌颖, 赵葆常, 邱跃洪等. 声光可调谐滤波器成像光谱仪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 3021~3026
- Liu Feng, Xu Xiping, Sun Xiangyang. Design of infrared (IR) hybrid refractive/diffractive lenses for target detecting/tracking [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2084~2088
刘峰, 徐熙平, 孙向阳. 折/衍射混合红外目标搜索/跟踪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2084~2088
- Chen Xiao, Yang Jianfeng, Ma Xiaolong *et al.*. Athermalization design of wide temperature range for hybrid refractive-diffractive objective in 8~12 μm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2089~2092
陈潇, 杨建峰, 马小龙等. 8~12 μm 折-衍混合物镜超宽温度消热差设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2089~2092
- Li Xiaotong, Cen Zhaofeng. Geometrical Optics, Aberrations and Optical Design[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2011. 286~291
李晓彤, 岑兆丰. 几何光学·像差·光学设计[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2011. 286~291
- Yi Chuan. The development and application of aspheric lens [J]. *Camera*, 1999, (8): 7~11
一川. 非球面透镜技术的发展和应[J]. *照相机*, 1999, (8): 7~11
- Zhou Huapeng, Chen Wenjian, Tang Shaofan. Optical system design for lens with relative aperture of 1:1 [J]. *J. Applied Optic*, 2007, **28**(1): 55~57
周华鹏, 陈文建, 唐绍凡. 相对孔径为 1:1 镜头的光学系统设计 [J]. *应用光学*, 2007, **28**(1): 55~57
- Li Qingbo, Xu Kexin, Ni Yong *et al.*. Study on characteristics of acousto-optic tunable filter optical system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(4): 329~333
李庆波, 徐可欣, 倪勇等. 声光可调谐滤波器分光系统光学特性的研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(4): 329~333
- Zhang Chunguang, Wang Hao, Qiu Yishen. Selection of design theory for near infrared noncollinear acousto-optic tunable filter [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0916001
张春光, 王号, 邱怡申. 近红外非共线声光可调谐滤波器设计理论的选取方法[J]. *中国激光*, 2011, **38**(9): 0916001

栏目编辑: 李文喆